

バラスト碎石集合体の有限要素法による衝撃波動伝播解析

鉄道総合技術研究所 正会員 ○相川 明
 鉄道総合技術研究所 正会員 浦川文寛
 鉄道総合技術研究所 正会員 名村 明

1. はじめに バラスト表面に加えられた衝撃荷重はバラスト内部を衝撃波として伝わる．本論文では，碎石集合体内部の衝撃波の伝播特性を，DEM と FEM を併用した固有モード解析および過渡応答解析により求め，バラスト内部での衝撃荷重伝播のメカニズムについて考察する．

2. 碎石単体モデル作成と固有値解析

2.1 碎石単体の DEM/FEM モデルの作成 碎石の頂点座標を測定し DEM 多面体モデルで表現し，さらに同サイズ同形状の FEM 四面体 2 次ソリッド要素に変換した(図-1)．メッシュサイズは 10mm である．碎石の物性値は，ヤング率 $E=30$ GPa，ポアソン比 $\nu=0.2$ ，単位体積重量 $\rho=2700$ kg/m³，構造減衰係数 $\eta=0.01$ とした．

2.2 碎石単体の固有値解析 60 個の碎石単体 FEM モデルに対して固有値解析を行った．解析例を図-2 示す．図中のコンターはひずみ値である．碎石の固有モードは，曲げやねじりからなり，その固有振動数は数十 kHz と非常に高く，最も低いものでも 11 kHz であった．

3. 碎石集合体有限要素モデルの構築と固有値解析

3.1 集合体モデルの構築 碎石単体 DEM モデル 89 個を 20 cm 角の箱に入れ，DEM ソフト(Itasca 社 3DEC)を用いて蓋の上面より 10 kN の荷重で締固めた(図-3)．解析結果より碎石配置と接触点情報を抽出し，多面体を FEM モデルに置き換えた．接触点については，接触点位置の節点間を硬いばね(ばね係数 $k=300$ GN/m) で 3 並進方向を結合した．

3.2 碎石集合体の固有値解析 碎石集合体の固有値解析を行った．その 1 次モードは碎石全体

が上下方向に弾性的に振動するモードであり，固有振動数は 1.72 kHz であった．また 2 次，3 次のモードはそれぞれ 1.98 kHz，2.03 kHz であった．これらはいずれも碎石単体の場合よりも 1 桁低い周波数帯にある．図-4 に 1 次モードのひずみ分布(横断面)を示す．図より，碎石が有する多数の稜角のうち，わずかな数点が局所的に変形してばねとして働き，他の部分は概ね剛体として振動することがわかる．また，実軌道は本例より規模が大きいことから，本解析の結果は，実軌道では道床がさらに低い周波数帯で共振しうることを示唆している．

3.3 列車走行荷重に対する碎石集合の過渡応答解析 まくらぎ下面荷重実測波形(在来線特急列車の先頭台車通過時，走行速度 120 km/h，測定面積 8cm × 8cm)

を，モデル上面の中央付近 4 点に均等に分散させて载荷した．時間刻みは 10 μ s である．図-5 は载荷荷重が最大となる，時刻 0.055 秒における碎石内部の応力分布(中心を通る縦断面)である．図より，応力は碎石集合体

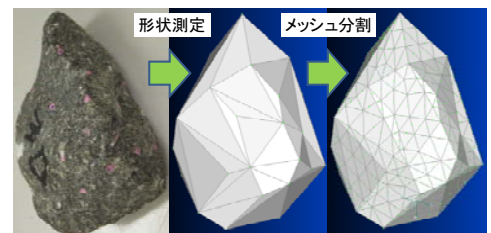


図-1 碎石の DEM/FEM モデル

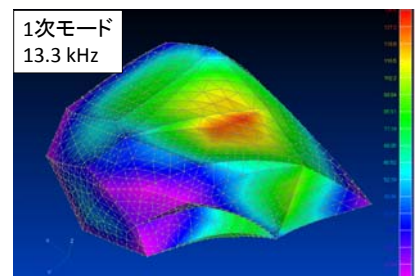


図-2 碎石単体の 1 次固有モード

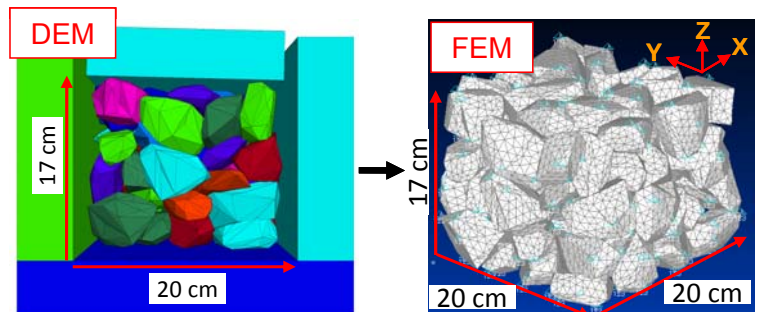


図-3 碎石集合体のモデル構築手順

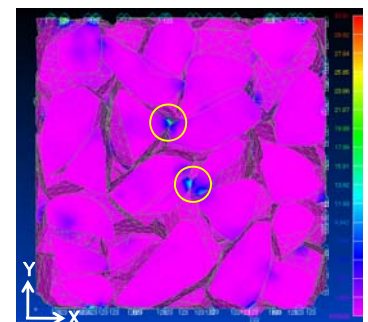


図-4 ひずみ分布
(XY 断面，Z = 0.132 m)

キーワード 個別要素法，有限要素法，道床バラスト，波動伝播解析，弾性波速度

連絡先 〒160-0004 東京都国分寺市光町 2-8-38 E-mail: aikawa@rtri.or.jp

内の一部の稜角(接触部)近傍に集中することがわかる. またモデル上面での 1.2 kN の载荷(0.1875 MPa)に対し, 接触部近傍で最大で 43 MPa の応力が発生した. 図-6 は, まくらぎ下 10 cm における砕石振動加速度の実測波形と, 砕石集合体モデルの加速度が最大となった節点での, 加速度の時刻歴応答波形である. なお, 解析値については, 本モデルの固有振動数 1.7 kHz による共振の影響を除外するために, 解析値に 1.2 kHz のローパスフィルタをかけた. 図より, 解析結果は実測波形とほぼ近い形となったことがわかる.

4. 砕石集合体の波動伝播解析

4.1 解析モデル インタクトな岩塊と砕石集合体の上面中央部(8cm × 8cm)に, 振幅 10 kN, 幅 5 μ s の衝撃波を入力した(図-7). 時間刻みは 1 μ s である.

4.2 解析結果 図-8(a)より, インタクトな岩塊では, 波は拡散しながら進行し, 時刻 47 μ s でモデルの下端に到達した. 一方, 図-8(b)に示すように, 砕石集合体では, 衝撃波は, 加振された砕石内部をインタクトな岩塊と同じ速度で進行するが, 殆どの波は砕石内部に留まり拡散と反射を繰り返す.

この波の内, 他の砕石との接触点に到達した一部の波は接触点を介して隣接する砕石に伝達され, さらに砕石単体内部を拡散しながら進み, 接触点にて一部の波が他の砕石に伝わるという複雑な経路を経て伝達される. 図-8(b)に示す時刻 60 μ s では, 波の先端がモデル中間付近に達するが, この時点でも上層の砕石では依然として強い波が拡散と反射を繰り返しながら残っている.

4.3 時刻歴応答 図-9 は, 砕石集合体モデルの载荷点直下の砕石接触点 4 点における von Mises 応力である. 図より, 加振点から遠ざかるほど応答の立ち上がりが遅れて緩やかになり, 応力値も減衰し波形は滑らかになる. モデル下端でのピーク到達時刻は 240 μ s であり, 波動の伝播速度は 710 m/s とインタクトな岩塊

(3610 m/s)の場合の約 1/5 になった. 一般に硬い岩盤の弾性波速度は $V_p = 3000 \sim 5000$ m/s, バラスト内では $V_p = 400$ m/s 程度であるが, 本論文では, 砕石層の波動伝播速度が低減し, 波動が大きく減衰するメカニズムを, 材料非線形性および境界非線形性を考慮していない弾性体解析のみから再現することができた.

5. まとめ 本論文では, 砕石集合体内部の衝撃波の伝播特性を解析的に検討した. 解析結果より, 砕石集合体のごく一部の稜角接触部に局所的に応力が集中し変形してばねとして働き, 他の部分は概ね剛体として振動することがわかった. また, バラストに载荷された波動は, ①砕石単体内部での波動伝播, ②拡散と反射による波動の滞留, ③隣接砕石接触部での一部の波動の伝達, ④接触部から伝達された波が砕石内で再び拡散と反射を繰り返すことで伝播されることを解析的に明らかにした. なお, 本解析では, 砕石接触部での摩擦損失を考慮していない. 今後, 摩擦減衰や境界非線形性を含めた接触部モデルの精緻化, および, 解析の大規模化により, バラスト劣化挙動再現の深度化が可能と考える.

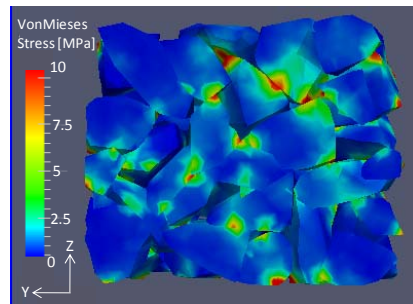


図-5 応力分布 (YZ 断面)

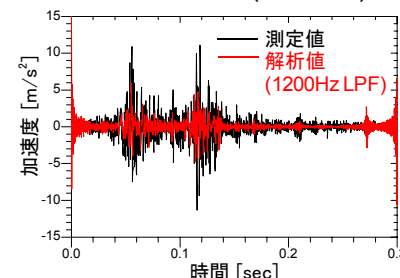
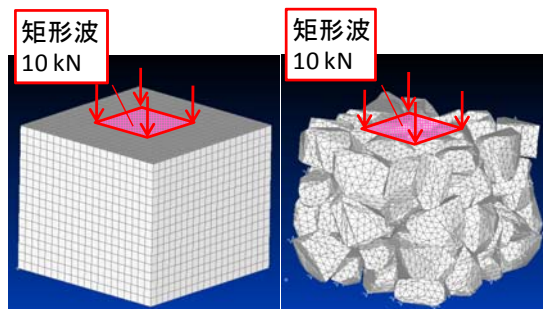
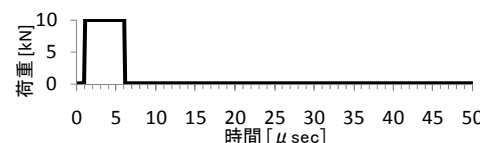
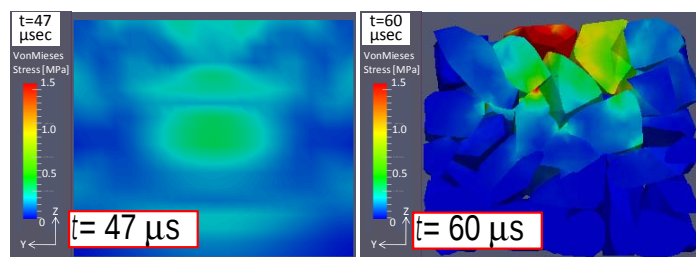


図-6 砕石振動加速度



(a)インタクトな岩塊 (b)バラスト集合体

図-7 解析モデルと加振条件



(a)インタクトな岩塊

(b)バラスト集合体

図-8 von Mises 応力分布 (YZ 断面)

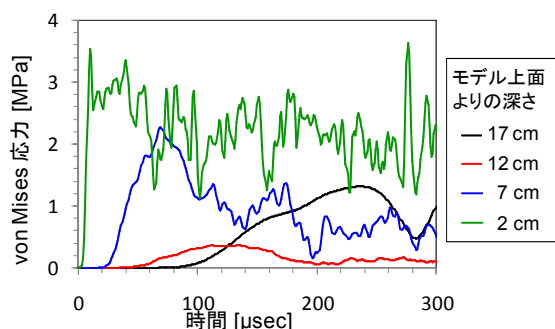


図-9 von Mises 応力の時刻歴応答